

РЕЦЕНЗІЯ

доктора технічних наук, доцента,
завідувача кафедри суднових електроенергетичних систем,
Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова
Обрубова Андрія Валерійовича

на дисертаційну роботу

Козлова Максима Олеговича

**«Зниження високочастотних кондуктивних електромагнітних завад в
пропульсивних електроустановках суден з частотно-регульованими
асинхронними електроприводами»,**

яка подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Актуальність теми дослідження

Актуальність дисертаційного дослідження обумовлена потребою забезпечення якості електроенергії та електромагнітної сумісності в суднових електроенергетичних системах з пропульсивними частотно-регульованими асинхронними електроприводами. Застосування перетворювачів частоти з ШІМ автономними інверторами напруги, поряд із високою енергоефективністю, призводить до генерації синфазних і диференціальних високочастотних електромагнітних завад. Ці завади негативно впливають на ізоляцію двигунів, функціонування електронного обладнання та якість електроенергії в мережі. У зв'язку з цим, дослідження механізмів утворення таких завад та розробка засобів їх зниження, таких як комбінований пасивний фільтр, є важливою науково-прикладною задачею, що має вагоме практичне значення для підвищення надійності суднових електроустановок.

Структура та зміст дисертації

Дисертаційна робота включає зміст, перелік умовних скорочень, вступ, чотири розділи, висновки, списку використаних джерел із 171 найменувань та три додатки. Загальний обсяг роботи становить 213 сторінок, у тому числі 160 сторінок основного тексту. Представлено 77 рисунків та 11 таблиць.

У вступі обґрунтовано актуальність дисертаційного дослідження, зв'язок з науковими програмами та темами, сформульовано мету і завдання дослідження, його об'єкт та предмет, описано методи дослідження, визначено наукову новизну та практичне значення результатів роботи та обґрунтування достовірності отриманих результатів, відображено повноту викладення результатів у публікаціях та ступінь апробації.

У першому розділі досліджено проблему високочастотних електромагнітних завад, що виникають у суднових частотно-регульованих асинхронних електроприводах внаслідок роботи ШІМ-інверторів. Основну увагу приділено синфазним струмам і напругам як головним складовим таких завад, обґрунтовано доцільність проведення подальших досліджень та розробки засобів їх зниження.

У другому розділі розроблено уточнену еквівалентну схему фази статора асинхронного двигуна з урахуванням паразитних ємностей, розвинуто аналітичні вирази для визначення її параметрів, удосконалено модель автономного інвертора напруги, а також методику визначення параметрів кабельних ліній. Наведено узагальнену схему електропривода, яка описує синфазні та диференційні завади і механізми їх поширення

Третій розділ присвячено сучасним методам зниження високочастотних електромагнітних завад. Запропоновано принцип побудови комбінованого трифазного пасивного фільтра, за рахунок поєднання чотириобмоткового синфазного трансформатора і трифазного диференційного RLC-фільтра. Розроблено його математичну модель, отримані кінцеві вирази за синфазною і диференційною складовими напруги, що дозволяє аналітично визначати параметри фільтра при його максимальній ефективності.

Четвертий розділ присвячено експериментальним та імітаційним дослідженням частотно-регульованого асинхронного електропривода та засобів зниження високочастотних електромагнітних завад. Автором розроблено метод експериментального дослідження високочастотних гармонічних спотворень. Перевірено ефективність комбінованого пасивного фільтра, та перевірено достовірність результатів зіставленням з експериментальними даними.

У загальних висновках сформульовані основні результати дисертації.

Таким чином, дисертаційна робота Козлова М.О. за структурою та змістом відповідає вимогам Міністерства освіти і науки України та предметній області спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Новизна отриманих результатів

Оцінюючи здобутки дисертаційного дослідження, варто вказати на наукову новизну та результати, які були отримані автором особисто:

- Отримала розвиток імітаційна модель пропульсивного частотно-регульованого асинхронного електропривода за рахунок уточнення моделей його складових – автономного інвертора напруги з ШІМ, асинхронного двигуна та кабельних з'єднань, яка дає можливість достовірно оцінювати характер і рівні диференційних та синфазних високочастотних складових електромагнітних завад в напрузі і струмах вхідних та вихідних кіл перетворювачів частоти та, на відміну від існуючих, враховує наявність паразитних ємностей «фаза-корпус» елементів електрообладнання електроприводу.

- Розроблено уточнену еквівалентну схему фази статора частотно-регульованого асинхронного двигуна, яка враховує паразитні міжвиткові ємності та ємності «фаза-корпус» фазових обмоток, і дозволяє достовірно відтворювати близькі до експериментальних частотні залежності повного опору фази двигуна, і, таким чином, може бути використана при створенні більш точної MATLAB-моделі асинхронної машини для дослідження високочастотних складових електромагнітних завад, та, на відміну від попередніх, є адекватною для діапазону частот 1 МГц – 60 МГц.

– Отримали розвиток аналітичні вирази для визначення параметрів еквівалентної схеми обмотки статора частотно-регульованого асинхронного двигуна за рахунок використання в них експериментально встановлених базисних значень повного опору обмотки та його характеру (індуктивний або ємнісний) на характерних частотах (в т. ч. резонансних), які можуть бути використані для типових двигунів та, на відміну від попередніх, частково спираються на експериментальні частотні залежності повного опору та його фазового зсуву в реальних двигунах.

– Вперше запропоновано принцип ефективного зниження високочастотних електромагнітних завад в колах частотно-регульованих асинхронних електроприводів на базі перетворювачів частоти з ШІМ автономними інверторами напруги, що ґрунтується на використанні нової топології комбінованого пасивного фільтра, який містить чотириобмотковий синфазний трансформатор та трифазний диференційний RLC -фільтр, що дозволяє повною мірою одночасно знижувати синфазні і диференційні складові завад, та, на відміну від попередніх, для формування компенсуючого впливу передбачає підключення первинної обмотки трансформатора до точки загального з'єднання RC -ланок диференційного фільтра.

– Розроблено нову математичну модель комбінованого пасивного фільтра, за рахунок застосування до його схеми еквівалентних перетворень згідно теореми Тевеніна і окремо теорії двополюсників, з наступними перетвореннями Лапласа, що надало можливість отримати кінцеві вирази передавальних функцій комбінованого фільтра відповідно за синфазною і диференційною складовими напруги та аналітично визначати параметри фільтра при його максимальній ефективності, а також, на відміну від існуючих моделей, дозволило врахувати умови компенсації складових електромагнітних завад.

Підсумовуючи, можна констатувати, що дисертаційна робота Козлова Максима Олеговича має ознаки наукової новизни в достатньому об'ємі для присудження здобувачу наукового ступеня доктора філософії.

Відповідність теми дисертації та рівня наукової обґрунтованості результатам досліджень

Тема дисертації відповідає наведеним у ній дослідженням. Рівень обґрунтованості результатів досліджень в цілому базується на використанні досвіду попередніх досліджень, які пройшли відповідну апробацію та являються визнаними, як об'єктивні та достовірні; на загальній теорії електротехніки та електромеханіки з використанням загальновизнаних прикладних програмних засобів, зокрема *MathCAD* та *Simulink*.

Особливо слід відзначити, що теоретичні положення, які отримані у роботі, перевірялися за допомогою експериментальних досліджень, котрі довели якісну збіжність теоретичних та експериментальних результатів.

Отже, дисертаційна робота Козлова Максима Олеговича містить достатню обґрунтованість наукових результатів досліджень.

Рівень виконання поставленого наукового завдання

Наукове завдання дисертаційної роботи Козлова Максима Олеговича складається з наступних завдань:

1. *Дослідити причини і механізми утворення та розповсюдження високочастотних завад в суднових пропульсивних електроустановках з ЧРАЕП на базі АІН з ШІМ, та існуючі методи та засоби їх зниження.*

Перший пункт виконано.

2. *Розробити нову еквівалентну схему фазної обмотки статора АД з короткозамкнутим ротором для уточнення моделі асинхронного двигуна.*

Завдання виконано, розроблено схему, яка враховує ємності обмоток статора і є адекватною для високочастотного діапазону.

3. *Розвинути аналітичні вирази для розрахунку параметрів еквівалентної схем фази статора АД, на основі базисних значень, отриманих з експериментальних частотних залежностей повного опору обмоток статора.*

Завдання виконано. Вирази для розрахунку параметрів еквівалентної схем фази статора наведено у другому розділі дисертації.

4. *Розробити уточнену імітаційну модель ЧРАЕП шляхом уточнення моделей АІН з ШІМ, АД, кабельних з'єднань, які мають враховувати паразитні ємності.*

Завдання виконано. Складові моделі електропривода наведено у другому розділі, а повна імітаційна модель представлена у четвертому розділі.

5. *Розробити принцип побудови комбінованого пасивного фільтра, який здатний одночасно і ефективно знижувати як диференційні, так і синфазні складові високочастотних ЕМЗ.*

Завдання виконано. У третьому розділі представлена нова топологія комбінованого пасивного фільтра, яка поєднує чотириобмотковий синфазний трансформатор з трифазним диференційним фільтром.

6. *Визначити умови компенсації диференційних та синфазних складових високочастотних ЕМЗ, генерованих АІН з ШІМ, комбінованим пасивним фільтром.*

Завдання виконано. Для ефективної компенсації диференційної складової необхідно забезпечити достатній рівень коефіцієнта затухання фільтра. Зменшення синфазної складової вимагає високого коефіцієнта взаємозв'язку між обмотками синфазного трансформатора.

7. *Розробити математичну модель та отримати кінцеві вирази передавальних функцій комбінованого пасивного фільтра за складовими напруги.*

Завдання виконано. У третьому розділі шляхом застосування еквівалентних перетворень відповідно до теореми Тевеніна та теорії двополюсників, а також подальшого використання перетворення Лапласа, було розроблено математичну модель комбінованого пасивного фільтра й отримано аналітичні вирази передавальних функцій для синфазної та диференційної складових напруги.

8. *Розробити метод експериментального дослідження високочастотних електромагнітних процесів в ЧРАЕП, який дозволить досліджувати гармонічні спотворення у високочастотному діапазоні.*

Завдання виконано. Запропоновано методику, що передбачає використання цифрового двоканального осцилографа для реєстрації сигналів, а також

розроблено програму для імпорту даних та проведення гармонічного аналізу за методом швидкого перетворення Фур'є (FFT) у середовищі MATLAB/Simulink.

9. *Розробити методологію визначення диференційної складової фазної напруги при експериментальному дослідженні.*

Завдання виконано. Методологія наведена у четвертому розділі.

10. *Дослідити, експериментальним шляхом високочастотні електромагнітні процеси у вхідних та вихідних колах перетворювача частоти у складі ЧРАЕП.*

Завдання виконано. Проведено експериментальне дослідження високочастотних електромагнітних процесів із використанням аналізатора якості електроенергії та цифрового осцилографа. Паралельно виконано моделювання в середовищі MATLAB на основі уточненої імітаційної моделі. Порівняння результатів підтвердило достовірність отриманих даних.

11. *Дослідити показники якості електроенергії і перевірити ефективність диференційного та комбінованого пасивного фільтрів на вході та виході ПЧ у складі ЧРАЕП на підставі уточненої MATLAB-моделі.*

Завдання виконано. Найвищу ефективність забезпечує застосування комбінованого пасивного фільтра, що дозволяє суттєво знизити рівень синфазної напруги та відповідно коефіцієнт гармонічних спотворень на виході і на вході перетворювача частоти. Відповідні результати наведено в четвертому розділі.

Таким чином, усі поставлені у дисертаційній роботі завдання виконані, що підтверджує досягнення поставленої наукової мети.

Повнота викладення положень дисертації в опублікованих працях

Результати дисертаційної роботи викладені у 10 публікаціях, у 4 статтях, з яких одна стаття у науковому виданні, включеному на дату публікації до переліку фахових видань України, а три статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних *Web of Science Core Collection* та/або *Scopus*. Ще 6 публікацій засвідчують апробацію матеріалів дисертації.

Обсяг наукових праць та їх кількість відповідає необхідним вимогам щодо публікації на здобуття ступеня доктора філософії відповідно до Постанови

Кабінету Міністрів України № 44 від 12.01.2022 р. «Порядок присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (із змінами внесеними згідно з Постановами КМ № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023, № 507 від 03.05.2024).

Відсутність порушення академічної доброчесності.

В процесі ознайомлення із дисертаційною роботою та із звітом щодо перевірки тексту рукопису електронним сервісом *TURNITIN* від 17.06.2025 р., порушень академічної доброчесності не встановлено. Всі наукові положення та результати інших науковців, використанні здобувачем у дисертаційній роботі, мають коректні посилання на відповідні джерела.

Зауваження щодо змісту дисертаційної роботи

1. Наукова новизна ліпше сприймається, коли спочатку йдуть більш значимі результати, наприклад, ті, що запропоновано вперше, розроблено новими тощо, а потім йдуть ті результати, які поліпшують існуючі досягнення або розширюють якісь попередні результати.

2. В тексті використовуються терміни передатна і передавальна функція.

3. Оглядова частина роботи розподілена на підрозділи 1.3-1.5 і 3.1. На мій погляд доцільно було присвятити тільки перший розділ роботи аналізу електромагнітних завад, їхній класифікації та існуючим методам і засобам зниження завад. Тоді подальші розділи вже за логікою дисертації демонструють доробки і результати здобувача у вирішенні поставленої проблеми.

4. Графічні залежності повного опору уточненої еквівалентної схеми фази статора асинхронного двигуна на рис.2.5, 2.6, 2.9 отримано за допомогою числового моделювання в середовищі *MATLAB*. Для підвищення наукової цінності та відтворюваності результатів доцільно було б також навести аналітичні вирази для математичного обчислення цих залежностей.

5. Зміст дисертації сприймається легше, якщо в перелік позначень винесено ще специфічні терміни з короткими поясненнями, наприклад, такий термін, як у третьому розділі «синфазна напруга» або «синфазні напруги».

6. У четвертому розділі подано опис лабораторного стенду та схему проведення експериментальних досліджень. Однак для підвищення наочності та кращого сприйняття матеріалу доцільно було б додати фотографію або ескіз стенду з позначенням основних його елементів.

7. Оцінка ефективності комбінованого пасивного фільтра проводилася лише в умовах статичного режиму роботи електропривода. Проте корисно було б оцінити також вплив фільтра на динаміку системи «перетворювач-двигун» при запуску і зупинці двигуна, а також при змінах механічного навантаження.

Загальна оцінка дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Козлова Максима Олеговича на тему: «Зниження високочастотних кондуктивних електромагнітних завад в пропульсивних електроустановках суден з частотно-регульованими асинхронними електроприводами» є цілісною, завершеною науково-дослідною роботою, яка виконана за актуальною темою, містить теоретичні та експериментальні дослідження, які спрямовані на вирішення науково-прикладного завдання – підвищення якості електроенергії в пропульсивних електроустановках з частотно-регульованими асинхронними електроприводами на базі перетворювачів частоти із ШІМ автономними інверторами напруги. Дисертаційна робота за об'ємом відповідає вимогам, які наведені у третьому абзаці в частині змін та доповнень Освітньо-наукової програми зі спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» затвердженої Вченою радою НУК імені адмірала Макарова протокол № 8 від 30.08.2018 р.

Роботу позитивно відрізняє наявність складних експериментальних досліджень з використанням сучасного обладнання та широке застосування програмних засобів.

Аналіз змісту дисертаційної роботи і опублікованих праць за темою дослідження дозволяє зробити висновок, що всі пункти наукової новизни, які мають місце, належним чином відображено у роботі.

Дисертаційна робота за науковим рівнем, практичною та науковою цінністю, обґрунтованістю основних результатів, кількістю публікацій та дотриманням принципів академічної доброчесності відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 (із змінами внесеними згідно з Постановами КМ № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023, № 507 від 03.05.2024), а її автор Козлов Максим Олегович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Рецензент:

доктор технічних наук, доцент,

завідувач кафедри суднових електроенергетичних систем,

Національного університету

кораблебудування

імені адмірала Макарова



Андрій ОБРУБОВ

Підпис засвідчую:

Вчений секретар

Світлана УТКІНА